

연료전지 시스템 특성해석을 위한 Matlab-PSIM 연동 시뮬레이션 기법

김중수, 강현수, 최규영, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Matlab-PSIM Co-Simulation Technique for Analysis of Characteristics of Fuel Cell System

Jong-Soo Kim, Hyun-Soo Kang, Gyu-Yeong Choe, Byoung-Kuk Lee
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는, 연료전지의 비선형 출력특성으로 인한 전력변환장치 (PCS)의 특성해석을 위해 Matlab Simulink로 구성된 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)와 PSIM으로 구성된 PCS의 연동 시뮬레이션 기법에 대하여 기술한다. 또한 제안된 연동 시뮬레이션을 기반으로 PEMFC 특성을 갖는 전원과 이상적인 정전압원이 PCS에 입력되었을 경우 나타나는 특성 시뮬레이션을 통해 비교 분석하고, 이를 통해 연료전지-PCS 연동 시뮬레이션의 필요성을 제시한다.

1. 서 론

연료전지는 전기화학반응으로 인한 발전 특성 때문에 고유의 비선형성 및 동특성을 갖는 직류 전압이 출력된다. 때문에 이를 사용자가 원하는 다양한 형태의 안정된 전력으로 변환 및 제어하기 위해서 PCS의 사용은 필수적이며, 외부 환경 및 조건에 강인하고 신뢰성 있는 PCS 설계를 위해서는 입력전원 및 부하특성의 이해 또한 필수적인 요소이다 [1].

이러한 연료전지와 PCS의 상호 영향을 분석하기 위해서 실 제품 제작 전 각 시스템의 정확한 모델링에 기반을 둔 시뮬레이션 수행이 효과적이다. 그러나 전기화학 특성을 바탕으로 한 연료전지와 전기적 능동 및 수동부품의 특성을 바탕으로 한 PCS의 특성 차이 때문에 두 시스템의 상호 영향을 효과적으로 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 찾는 것은 쉽지 않다. 일반적으로 연료전지 모델링 및 시뮬레이션을 위해서 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics: CFD) 기반 시뮬레이션 프로그램인 pro-STAR의 es-pemfc, es-sofc 패키지 등이 주로 사용되고 있고, PCS 시뮬레이션을 위해서 PSIM, Pspice, Saver 등이 사용되고 있다 [2],[3]. 이러한 전용 프로그램은 각 시스템의 특성을 잘 나타내주지만 상호 영향을 분석할 수 있는 기능을 제공하지 못한다. 때문에 몇 가지 방법의 시스템 모델링 및 시뮬레이션 모델 구성이 수행되었다. 이 중 트랜지스터, 다이오드, 커패시터, 인덕터 등 전기적 능동 및 수동소자를 이용하여 Pspice를 기반으로 연료전지 특성을 모델링하고 PCS와 연계 시뮬레이션을 할 수 있는 시뮬레이션 모델이 제안되었다 [4]. 이 모델은 구성이 간단하고 하나의 시뮬레이션 프로그램에서 구현할 수 있는 장점이 있지만, 연료전지의 특성변화에 능동적 대처가 어렵고 정확한 모델링이 제한적인 단점을 갖는다. 이상의 방법들로는 연료전지-PCS의 상호 영향을 시뮬레이션을 통해 해석하기 어렵다.

다른 한편, 연료전지는 전기화학 방정식 기반으로 정확한 모델링이 가능하기 때문에 Matlab Simulink에서 제공하는 함수 블록을 이용하여 쉽게 시뮬레이션 모델을

구성할 수 있으며, 반응 및 출력의 동특성뿐 아니라 연료 및 산소 공급모듈의 동특성도 함수 블록을 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. 그러나 아날로그 소자로 구성된 전력회로의 경우 GUI에 의해 해석시간이 길어지며 복잡한 전력회로를 시뮬레이션 하기 어려운 단점이 있다. 따라서 PCS의 회로해석 측면에서 빠른 연산시간과 컨버전스 에러가 적은 장점을 갖는 PSIM을 이용하여 전력변환 회로를 구성하고 Matlab Simulink와 인터페이스가 가능한 SimCoupler 모듈을 이용하면 연료전지-PCS 상호영향을 분석할 수 있는 시뮬레이션 모델을 쉽게 구성할 수 있다.

따라서 본 논문에서는, 연료전지의 비선형 출력특성으로 인한 전력변환 시스템의 특성해석을 위해 연료전지를 전기화학 방정식으로 모델링하고 MATLAB Simulink를 이용하여 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 그리고 PSIM을 이용하여 PCS 시뮬레이션 모델을 구성하고, 두 시뮬레이션 모델의 연동 시뮬레이션 기법을 상세히 기술하였다. 또한 제안된 기법을 통해 기존의 이상적인 직류 전압원이 PCS에 입력될 경우와의 차이점을 분석하여 시뮬레이션 모델의 필요성 및 타당성을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 연료전지 모델링 및 시뮬레이션 모델 구성

가정용, 휴대용 및 차량용에 주로 사용되고 상온 동작이 가능한 PEMFC를 모델링하고 Matlab Simulink로 시뮬레이션 모델을 구성하였고, PCS는 풀브리지 컨버터와 유니폴라 정현파 PWM (SPWM) 인버터를 선택하고 PSIM 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 모델을 구성하였다.

2.1.1 PEMFC 비선형 전압 특성 모델링

PEMFC의 출력 특성은 깁스 자유 에너지로 설명할 수 있다. 이론적 한계전압 (OCV)은 1.229V 이고 비표준 상태의 이론적 전극 전위는 연료, 산소 및 물의 분압과 온도에 의해 결정되는 네른스트 방정식으로 정의되며 식 (1)과 같다.

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \quad (1)$$

여기서, E^0 는 평형전극전위, R 은 가스상수 (8.3144 J/mol K), T 는 절대온도 (K), F 는 페러데이 상수 (96,495 C/mol), P 는 분압을 나타낸다.

실제 연료전지의 출력전압은 이론적 전극 전위에서 활성화 분극, 저항 분극, 농도 분극과 같은 비가역 손실에 의한 전압강하를 뺀 전압으로 나타나기 때문에 일반적으로 OCV의 약 50% 정도의 전압이 정격조건에서 출력되는 비선형 특성을 보이게 되며 각 분극으로 인한 전압 손실은 식 (2)-(4)와 같다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (2)$$

$$\eta_{ohmic} = IR_T \quad (3)$$

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (4)$$

여기서, α 는 전이계수, n 은 반응에 참여한 전자의 개수, i_0 는 교환전류밀도, i_L 는 전류밀도, $R_T = r_i + r_e + r_c$ 이고, r_i 는 이온저항, r_e 는 전기저항, r_c 는 접촉저항, i_L 는 제한 전류밀도를 나타낸다.

또한 촉매, 촉매의 로딩면적, 전극면적, 반응물의 분압 등에 의해 결정되는 교환전류밀도는 연료전지 성능에 중요한 파라미터이며 식 (5)와 같이 모델링 할 수 있다.

$$I_0 = I_0^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}} \right)^\gamma \exp \left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}} \right) \right] \quad (5)$$

여기서, I_0^{ref} 는 표준온도 및 압력에서 실제 촉매 도포면적에서의 기준 교환전류밀도, a_c 는 종에 따른 촉매면적, L_c 는 촉매도포면적, 그리고 γ 는 반응물에 따른 반응차수이다.

결론적으로 PEMFC 스택의 운전전압은 평형전위에서 각 분극으로 인한 손실을 뺀 전압으로 표현되고, 연료 및 산소의 압력과 여러 화학적 특성에 영향을 받아 결정된다. 식 (6)은 PEMFC 단위 셀의 비선형 출력전압 방정식을 나타낸다.

$$V_{cell} = E - (i + i_0)r - A \ln \left(\frac{i + i_0}{I_0^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}} \right)^\gamma \exp \left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}} \right) \right]} \right) + B \ln \left(1 - \frac{i + i_0}{i_L * P} \right) \quad (6)$$

여기서, $A = \frac{RT}{\alpha nF}$, $B = \frac{RT}{nF}$ 는 타펠 기울기이다.

2.1.2 PEMFC 시뮬레이션 모델 구성

그림 1은 전기화학 방정식으로 모델링 된 PEMFC를 Matlab Simulink를 이용하여 구성한 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 네른스트 방정식, 활성화 분극, 농도 분극 그리고 교환전류밀도는 Simulink 툴-박스의 'function block'을 이용하여 구성하였고, Math Operations 툴-박스의 'Sum', 'Substrate', 'Gain block', Signal Routing 툴-박스의 'MUX', Sources 툴-박스의 'Constant', 'In', 'Out' block 등을 이용하면 간단히 구성할 수 있다.

또한, 연료전지 특성 변화에 따라 능동적으로 대응하고 변수 튜닝을 쉽게 하기 위해 변수 튜닝 'Mask' block을 구성하였다. 구성된 블록을 통해 각 분극의 크기 및 교환전류밀도의 크기를 쉽게 바꿀 수 있다.

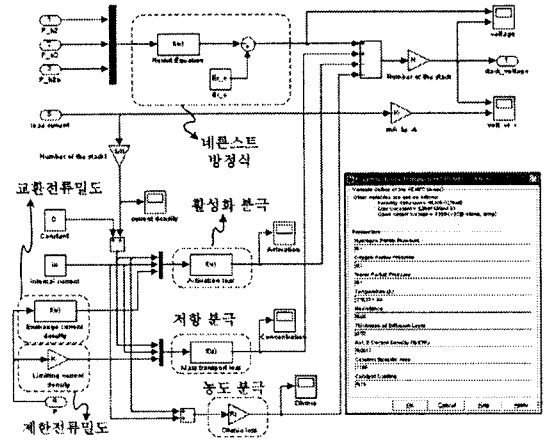


그림 1 제안된 PEMFC 시뮬레이션 모델

2.1.3 PCS 시뮬레이션 모델 구성

Matlab Simulink로 구성된 PEMFC 시뮬레이션 모델용 PCS로 1kW급 풀브리지 컨버터와 유니폴라 SPWM 인버터를 선정하였다. 시뮬레이션에 사용된 PCS의 사양은 표 1과 같고, 그림 2는 PCS의 블록 다이어그램을 나타낸다.

표 1 PCS 사양

사양	풀브리지 컨버터	SPWM 인버터	단위
정격전력	1200	1200	W
입력전압	26 ~ 42	380	Vdc
출력전압	380	220	Vdc/Vac
출력전류	3.16	5.45	A
고주파 TR	3:36	-	turn
LC 필터-L	3	3	mH
DC 커패시터	1500	1500	uF
LC 필터-C	-	20	uF
스위칭주파수	60	4.5	kHz

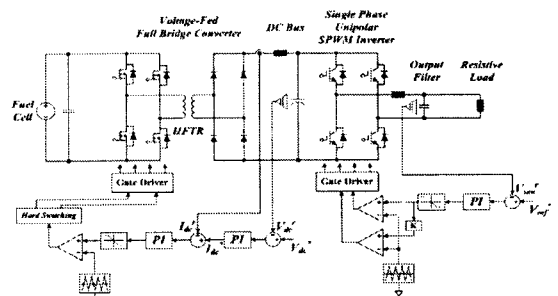


그림 2 PCS 블록 다이어그램

2.2 Matlab-PSIM 연동 시뮬레이션 모델 구성

구성된 PEMFC와 PCS를 SimuCoupler 모듈을 이용하여 연동 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 그림 3(a)는 Matlab Simulink에서 SimuCoupler의 구성도를 나타내고, (b)는 PSIM의 SimCoupler 모듈 (SLINK_IN, SLINK_OUT)을 나타낸다. 연료전지 출력전압을 PCS의 입력으로 연결하고, PCS의 출력전류를 연료전지의 단면적에 맞게 스케일링하여 전류밀도 (A/cm^2) 정보로 PEMFC 모델에 입력한다. PSIM에서 'Generate Netlist File'을 실행시키면 PSIM Netlist 파일인 '.cct' 파일이 생성되고, 이 파일을 Matlab Simulink SimCoupler 모듈에서 링크시킨다. 그리고 Matlab의 디렉터리를 PSIM 디렉터리로 변경시킨 후 시뮬레이션 'Time step' 및 'Total time'을 일치시킨 후 시뮬레이션을 수행하였다 [5],[6].

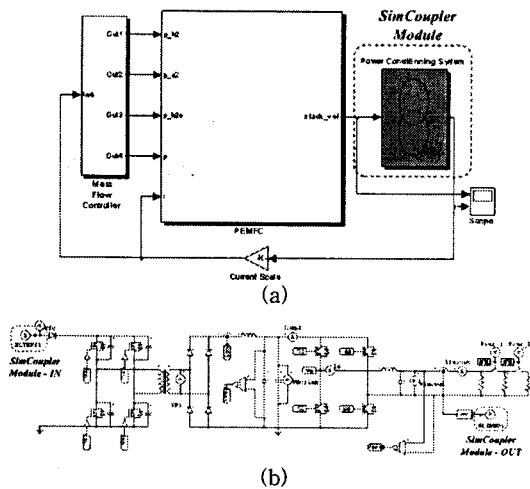


그림 3 Matlab-PSIM 연동 시뮬레이션 모델 구성
(a) Matlab Simulink에서 SimCoupler 구성
(b) PSIM에서 SimCoupler 구성

2.3 시뮬레이션

전기화학 방정식으로 모델링된 PEMFC 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위하여 스택 전류밀도 변화에 따른 비선형 출력전압을 시뮬레이션 하였고, PCS와 연동 시뮬레이션을 통해 반도체 스위치의 전류 스트레스를 분석하였다.

그림 4는 Matlab Simulink로 구성된 PEMFC모델의 유량변화와 및 분압 변화에 따른 연료전지 비선형 출력 특성을 나타낸다. 연료전지 시스템의 출력전압은 유량변화에 따라 제한전류와 교환전류 밀도가 변하고, 유량이 비례하여 전체적인 V-I 특성곡선이 변하게 되는데 PEMFC 모델이 이러한 특성을 잘 반영하고 있음을 그림 4를 통해 알 수 있다.

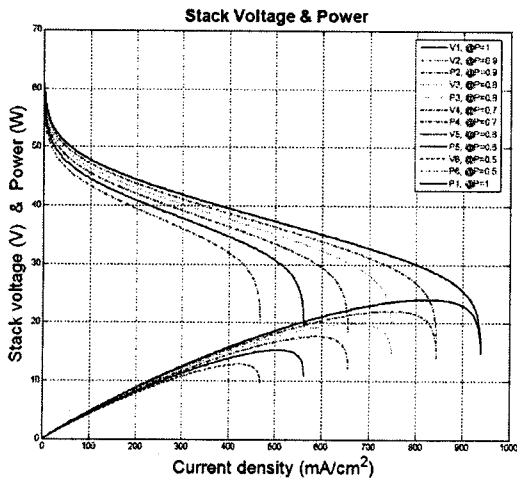


그림 4 수소와 산소 유량에 따른 비선형 출력 특성

그림 5(a)는 기존의 이상적인 직류 전압원이 인가된 경우의 컨버터 출력전압과 인버터 출력 전압 및 전류파형을 보여준다. 부하변화에 관계없이 입력전압이 일정하게 유지된다. 그림 5(b)는 PEMFC 전원이 인가된 경우이고 300W+600W+1200W의 부하변화에 따라 입력전압이 최대 6.8V까지 변화되는 것을 볼 수 있으며, 전압 변동범위는 파라미터 튜닝으로 조정 가능하다.

최대부하조건에서, 그림 6(a)는 이상적 직류 전압원, (b)는 PEMFC 전원 인가 시의 컨버터 입력전류를 나타낸다. 기존 직류전원의 경우 최대전류는 42A, 실효치는 25.5A이고, PEMFC 전원이 인가될 경우 최대전류는 46A, 실효치는 35.3A로 기존 직류전원의 경우에 비해 약 138%의 전류 스트레스를 받는다는 것을 알 수 있다.

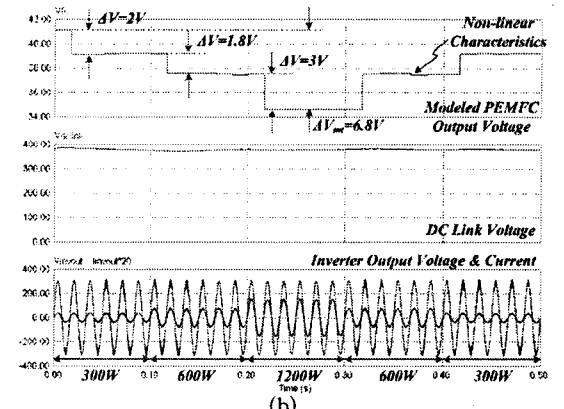
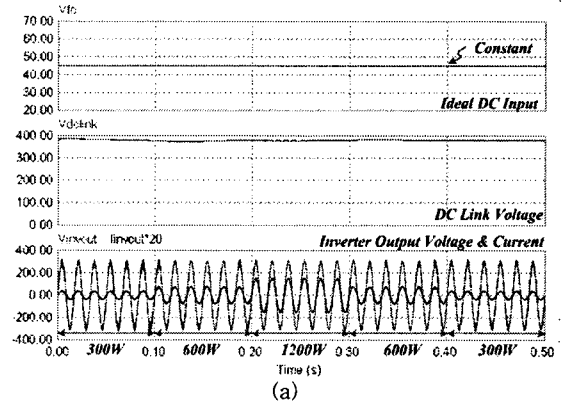


그림 5 PEMFC-PCS 연동 시뮬레이션
(a) 이상적 직류전압원이 인가되었을 경우
(b) 모델링 된 PEMFC 전원이 인가되었을 경우

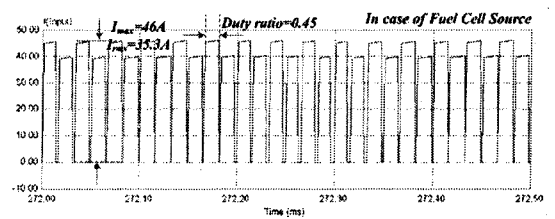
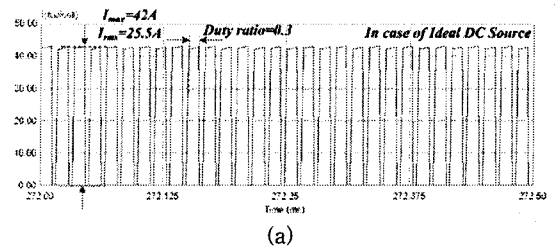


그림 6 최대부하 시 입력전류 파형
(a) 이상적인 직류전압원이 인가되었을 경우
(b) 모델링 된 PEMFC 전원이 인가되었을 경우

3. 결 론

본 논문에서는, 연료전지 발전 시스템의 특성해석을 위해 PEMFC의 비선형 출력특성을 전기화학적으로 모델링하였고 다양한 수학적 리 라이브러리를 제공하는 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 또한 회로해석 측면에 유리한 PSIM을 이용하여 PCS 시뮬레이션 모델을 구성하였고, 두 시뮬레이션 모델의 연동 시뮬레이션 기법을 기술하였다. 본 시뮬레이션 모델을 통하여 연료전지 발전 시스템에 적용되는 PCS의 경우 이상적인 직류 전압원에 비해 컨버터 스위치 전류 스트레스가 더 증가되는 것을 확인하였고, 향후 연료전지용 PCS의 스위치 열화특성, 커패시터 수명예측, 제어기 및 보상기 설계 등 다양한 특성을 해석하는데 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. S. Kim, H. S. Kang, B. K. Lee, and W. Y. Lee, "Analysis of low frequency ripple current of a fuel cell system based on a residential load bank modeling," *IEEE International Conferences on Electrical Machines and Systems (ICEMS 07)*, pp. 282-287, October 2007
- [2] D. Natarajan, T. V. Nguyen, "Three-dimensional effects of liquid water flooding in the cathode of a PEM fuel cell," *Journal of Power Sources*, 115, pp. 66-80, 2003
- [3] B. K. Lee and M. Ehsani, "A simplified functional simulation model for 3-phase voltage-source inverter using switching function concept," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 309-321, 2001
- [4] Yu. D. Yuyarajan, S., "A Novel circuit model for PEM fuel cells" APEC '04. Nineteenth Annual IEEE, vol. 1, pp. 362-366, 2004
- [5] PSIM user's guide, Version 7.0, Release 3
- [6] MATLAB, Simulink[®] user manual